УДК 620.179.16

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕСТ РАЗРУШЕНИЯ В МАТЕРИАЛАХ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ НА ПРИМЕРЕ СТАЛЕЙ М16С И Ст.3сп

Е.С. Никитин

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск
Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
E-mail: zooms02@yandex.ru

Изучено явление макролокализации деформации в сталях М16С и Ст.3сп. С помощью акустического комплекса были получены координаты источников сигналов акустической эмиссии в диапазоне частот до 2 МГц. Методом эволюционного распределения полей координат показано, что на всех стадиях пластической деформации наблюдается их периодичность, и координата места разрушения совпадает с одним из максимумов результирующего распределения источников сигналов акустической эмиссии. Предложенный метод позволяет экспериментально исследовать кинетику процессов локализации непосредственно в процессе деформации (in situ) и определять координаты мест вероятного разрушения.

1. Введение

В ряде работ по изучению акустической эмиссии (АЭ) в твердых телах [1–4] показано, что между распределением активности акустической эмиссии и состоянием исследуемого материала существует взаимосвязь. В этих работах в основном приводятся распределения частот появления сигналов АЭ в зависимости от деформации. Существуют работы [1, 2], в которых приводятся результаты исследования локализации источников сигналов (ИС) АЭ. В них показано, что разрушение исследуемого образца происходит в месте, соответствующем зоне с наиболее частым появлением сигналов АЭ.

В других работах [5, 6] обнаружена связь пластического течения твердого тела при нагружении выше предела упругости с локальной потерей его сдвиговой устойчивости и обобщены закономерности кинетики процессов макролокализации [7, 8], а также обнаружены новые механизмы локализованного пластического течения в поверхностных слоях деформируемого образца [9]. Но вопрос о природе деформационных структур, их связи со структурой образца, со стадиями пластической деформации и распределением ИС АЭ на данный момент времени остается открытым.

2. Эксперимент

Запись сигналов АЭ, возникающих при деформации, и регистрируемых пьезокерамическими преобразователями, производилась с помощью аналого-цифрового преобразователя ЛА-н20-12PCI. Одновременно получали деформационные кривые с использованием испытательной машины Instron-1185.

На рис. 1 представлена схема проведения эксперимента.

При записи деформационной кривой фиксировали время начала проведения эксперимента, время его окончания и каждый отсчет производили через 1 с. По времени создания каждого очередного файла сигнала АЭ и величине деформации имеется возможность сопоставления параметров сигналов АЭ с состоянием деформируемого образца с точностью до 1 с.

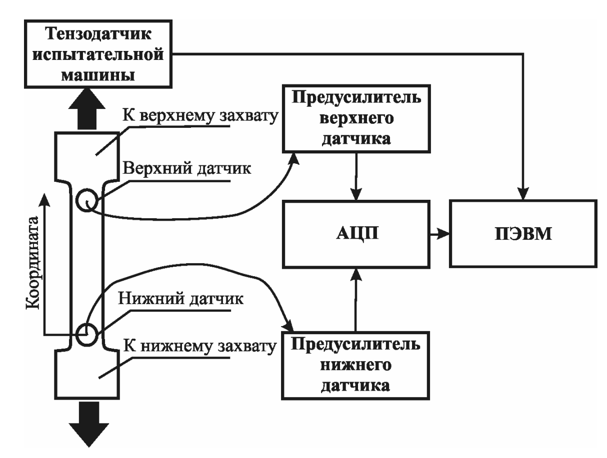


Рис. 1. *Схема проведения экспериментов*

Для регистрации сигналов АЭ были использованы пьезокерамические датчики П113, имеющие одинаковые параметры, с амплитудно-частотной характеристикой по уровню 3 дБ 0,5...2 МГц. Выбор таких датчиков обусловлен тем, что в эксперименте испытывались образцы, не содержащие дефекты типа трещин, поэтому акустическая эмиссия обусловлена развитием более мелких, а, следовательно, более высокочастотных дефектов, таких, как ансамбли дислокаций. Каждая отдельная пара регистрируемых сигналов с двух датчиков после усиления на предусилителях марки САА-06 поступала на прецизионный аналого-цифровой преобразователь ЛА-н20-12PCI с частотой дискретизации до 50 МГц и с двумя синхронными каналами. При этом выборка составляла 131072 точки на каждый канал. Использование АЦП с такими параметрами позволило производить запись только сигналов АЭ, уровень которых превышает заранее заданный порог, обусловленный шумами. Сигналы с АЦП поступали на ПЭВМ, где производилась процедура формирования файлов и дальнейшей их обработки.

3. Программное обеспечение и методика обработки данных

Разработанный для обработки таких видов и объемов информации пакет программ [10] способен:

1) производить чтение сигнала из файла;
2) производить обработку сигналов АЭ, заключающуюся в определении разности времен прихода сигналов АЭ на пьезокерамические преобразователи по фронту сигнала при средней скорости звука в материале 3000 м/с с минимальной абсолютной теоретической погрешностью $6 \cdot 10^{-5}$ м;
3) по известной разности времен прихода вычислять координаты ИС АЭ;
4) работать в режиме реального времени;
5) представлять визуально локализацию ИС;
6) производить математическую и статистическую обработку распределений ИС по длине образца;
7) сопоставлять и сохранять в файл распределение источников сигналов по длине образца с деформационной кривой;
8) формировать файлы, содержащие сигналы АЭ и их спектры;
9) производить гибкую настройку параметров обработки сигналов АЭ и сохранения полученных в результате обработки данных.

Согласно [1, 2] место наиболее частого появления сигналов АЭ соответствует месту разрушения, что объясняется тем, что каждый акт АЭ является следствием акта развития деформационных структур, а определение места наиболее частого появления сигналов АЭ означает определение места с наиболее активным развитием деформационных структур в материале, приводящим в итоге к разрушению. Таким образом, необходимо построить распределения ИС АЭ по длине образца с течением времени, сглаженные определенным образом. Появление в этом распределении максимумов означает наиболее активное развитие в этих местах деформационных структур, что в итоге может привести к разрушению в области одного из этих максимумов.

Для построения диаграмм сглаженного распределения ИС АЭ с накоплением по длине образца с течением времени использовали разработанный нами метод размытия каждой пространственной координаты ИС АЭ с одновременным суммированием полученных распределений.

Размытие пространственных координат осуществляется путем использования функции распределения Гаусса или нормального распределения:

$$\mathrm{Gauss}(x,a) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}. \qquad (1)$$

В нашем случае необходимо, чтобы максимальное значение сглаживающей функции было равным единице, поэтому в выражении (1) множитель перед экспонентой принимается равным единице для того, чтобы, варьируя коэффициент σ, добиться необходимой степени сглаживания пространственной координаты. Таким образом, мы имеем:

$$Sgl(x,a) = e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}. \qquad (2)$$

Операция сглаживания выполняется для каждого значения координаты x ИС АЭ.

Затем производится операция суммирования полученных распределений по алгоритму, выраженному следующей формулой:

$$Raspr_t = \sum_{i=1}^{t} Sgl_i(x,a). \qquad (3)$$

Смысл формулы (3) таков: в каждый момент времени t суммарное сглаженное распределение ИС АЭ по длине образца является суммой всех сглаженных распределений до момента t. Вычисление суммарного сглаженного распределения ИС АЭ по формуле (3) для построения эволюционных сглаженных распределений ИС АЭ является нерациональным, поскольку на каждом следующем шаге производится суммирование уже вычисленных распределений, поэтому целесообразно применить алгоритм, поясняемый следующей формулой:

$$\begin{cases} Raspr_1 = Sgl_1(x,a), \\ Raspr_t = Raspr_{t-1} + Sgl_i(x,a). \end{cases} \qquad (4)$$

Применение формулы (4) позволяет существенно сократить число повторяющихся операций суммирования. Вычисляя по формуле (3) распределения при наличии n ИС АЭ приходится выполнять $n(n-1)/2$ операций суммирования, в то время как по формуле (4) требуется всего $(n-1)$ операций суммирования, т. е. в $n/2$ раза меньше.

2. Образцы

Были исследованы образцы, выполненные из стали М16С и из стали Ст.3сп. Образцы имели разные геометрические размеры и площадки для закрепления в зажимах испытательной машины, что привело к тому, что расстояние между датчиками для каждого из них было различным.

Исследованные материалы и результаты эксперимента представлены в таблице.

Таблица. *Результаты экспериментов*

№ образца	Марка стали	Рабочая длина, мм	Ширина, мм	Толщина, мм	Скорость нагружения, мм/мин	Расстояние между датчиками (база), мм	Координата места разрушения, мм
1	М16С	70	10	4,5	0,5	63	38
2		70	10	4,5	0,5	64	35
3	Ст.3сп	73	10	5	5	45	55
4		73	10	5	5	48,5	34
5		73	10	5	5	51,5	54

3. Результаты

В результате обработки были получены распределения локализации ИС АЭ по длине образца для исследованных сталей.

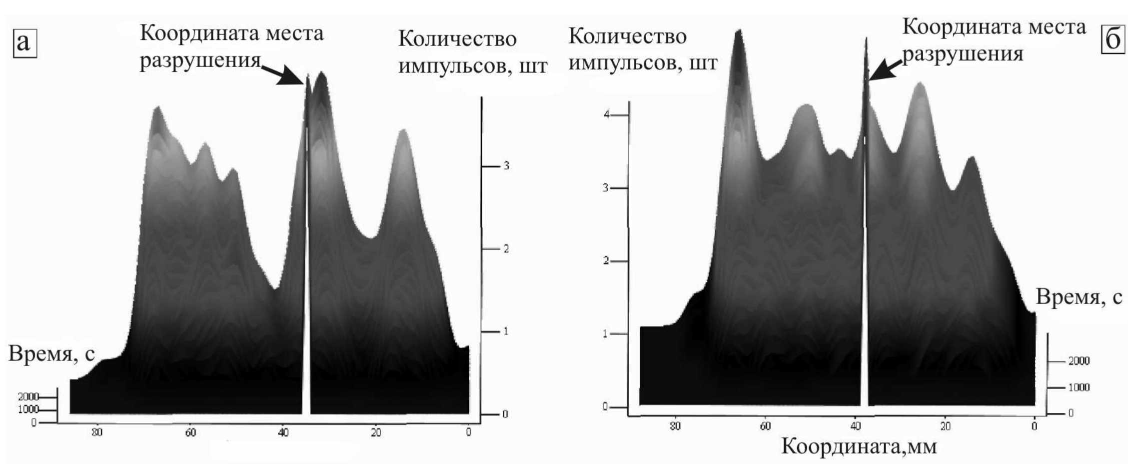


Рис. 2. *Распределения ИС АЭ для образцов, изготовленных из стали М16С: а) образец № 1; б) образец № 2*

Рис. 3. *Распределения ИС АЭ для образцов, изготовленных из стали Ст.3сп. Образцы: а) № 3; б) № 4; в) № 5*

На рис. 2 представлены сглаженные распределения ИС АЭ, полученные с применением методики, описанной выражением (4), и обозначены координаты мест разрушения для образцов, изготовленных из стали М16С.

Аналогичные сглаженные распределения ИС АЭ представлены на рис. 3, на котором также обозначены координаты мест разрушения для образцов, изготовленных из стали Ст.3сп.

Распределение ИС АЭ по длине образца с течением времени не является равномерным (рис. 2, 3), наблюдается чередование максимумов и минимумов, соответствующих макролокализации деформации. При сопоставлении рис. 2 и 3 с данными таблицы следует, что координата места разрушения достаточно точно совпадает с одним из максимумов распределения, но до наступления разрушения с достоверностью сказать, каким именно, нельзя. Ответ на вопрос о том, в каком именно максимуме произойдет разрушение, предполагается получить путем анализа динамики вероятных траекторий источников сигналов акустической эмиссии на стадии предразрушения или более ранней стадии.

Заключение

В результате изучения акустическим методом макролокализации деформации в сталях М16С и Ст.3сп были определены координаты источников сигналов акустической эмиссии. Предложен метод построения эволюционных полей координат источников сигналов. Установлено, что в сглаженных распределениях наблюдается периодичность чередования максимумов и минимумов. Показано, что один из максимумов в полученном распределении совпадает с местом вероятного разрушения образца с точностью ±1 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Botten R., Wu X., Hu D., Loretto M.H. The significance of acoustic emission during stressing of TiAl-based alloys. P. 1: Detection of cracking during loading up in tension // Acta mater. – 2001. – № 49. – P. 1687–1691.
2. Botten R., Wu X., Hu D., Loretto M.H. The significance of acoustic emission during stressing of TiAl-based alloys. P. 2: Influence of cracks induced by pre-stressing on the fatigue life // Acta mater. – 2001. – № 49. – P. 1693–1699.
3. Lambert G.X., Sturel T., Gourgues A.F., Gingell A. Application of acoustic emission to the study of cleavage fracture mechanism in a HSLA steel // Scripta mater. – 2000. – № 43. – P. 161–166.
4. Chung-Kwei Lin, Sang-Ha Leigh, Christopher C Berndt. Acoustic emission responses of plasma-sprayed alumina-3 % titania deposits // Thin Solid Films. – 1997. – № 310. – P. 108–114.
5. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов / Под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Наука, 1995. – Т. 1. – 297 с.
6. Panin V.E. Synergetic principles of physical mesomechanics // Theor. Appl. Fracture Mech. – 2001. – V. 37. – № 1-3. – P. 261–298.
7. Zuev L.B., Danilov V.I. A self-excited wave model of plastic deformation in solids // Philosophical Magazine. A. – 1999. – V. 79. – № 1. – P. 43–57.
8. Zuev L.B. Wave phenomena in low-rate plastic flow of solids // Annalen der Physik (Leipzig). – 2001. – V. 10. – № 11–12. – P. 965–984.
9. Зуев Л.Б., Данилов В.И. Медленные автоволновые процессы при деформации твердых тел // Физическая мезомеханика. – 2003. – Т. 6. – № 1. – С. 75–94.
10. Никитин Е.С. Связь параметров разрушения деформируемых металлов с локализацией и спектром источников сигналов акустической эмиссии // Фундаментальные проблемы новых технологий в 3-м тысячелетии: Матер. III Всерос. конф. молодых ученых. – Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2006. – С. 684–687.

УДК 621.396